

석탄광산배수슬리지를 이용한 액상상태의 비소제거 흡착특성 및 반응속도에 관한 연구

이세반·최명찬·장민¹⁾·문덕현²⁾·조윤철³⁾·김지형*

고려대학교 건축사회환경공학과, ¹⁾한국광해관리공단, ²⁾조선대학교 환경공학과, ³⁾광운대학교 녹색환경에너지대학원
(2010년 11월 12일 접수; 2010년 12월 27일 수정; 2011년 1월 5일 채택)

A Study of Kinetics and Adsorption Characteristics for Removal of Arsenate by Using Coal Mine Drainage Sludge in Aqueous Phase

Seban Lee, Mingcan Cui, Min Jang¹⁾, Deok Hyun Moon²⁾, Yunchul Cho³⁾, Jeehyeong Khim*

Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

¹⁾Korea Mine Reclamation Corporation, Institute of Mine Reclamation Technology, Seoul 110-727, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

³⁾Graduate School of Green Environment & Energy, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Manuscript received 12 November, 2010; revised 27 December, 2010; accepted 5 January, 2011)

Abstract

In this research, equilibrium of adsorption and kinetics of As(V) removal were investigated. The coal mine drainage sludge(CMDS) was used as adsorbent. To find out the physical and chemical properties of CMDS, XRD (X-ray diffraction), XRF (X-ray fluorescence spectrometer) analysis were carried out. The CMDS was consist of 70% of goethite and 30% of calcite. From the results, an adsorption mechanism of As(V) with CMDS was dominated by iron oxides. Langmuir adsorption isotherm model was fitted well more than Freundlich isotherm adsorption model. Adsorption capacities of CMDS 1 was not different with CMDS 2 on aspect of amounts of arsenic adsorbed. The maximum adsorption amount of two CMDS were respectively 40.816, 39.682 mg/g. However, the kinetic of two CMDS was different. The kinetic was followed pseudo second order model than pseudo first order model. Concentrations of arsenic in all segments of the polymer in CMDS 2 does not have a constant value, but the rate was greater than the value of CMDS 1. Therefore, CMDS 2, which is containing polymer, is more effective for adsorbent to remove As(V).

Key Words : Arsenate, Coal mine drainage sludge, Polymer, Adsorption isotherms, Adsorption kinetics

1. 서론

유니세프는 2010년 2월 22일 세계 물의 날을 맞아

방글라데시 수도 다카에서 발표한 보고서를 통해 방글라데시의 많은 사람들이 비소 중독 때문에 매년 20만~27만 명이 죽는다고 밝혔다. 이는 1984년 인도 보팔 독가스 누출사고나 1986년 우크라이나 체르노빌의 핵발전소 사고를 뛰어넘는 사상 최악의 환경 재앙이다(Lee, 2010). 이러한 유해한 비소를 제거하기 위해 많은 연구를 진행하고 있으며 다양한 방법이 개발되고

*Corresponding author : Jeehyeong Khim, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
Phone: +82-10-8765-3318
E-mail: hyeong@korea.ac.kr

있다.

비소를 처리하기 위한 대표적 방법으로는 산화, 침전, 응집, 흡착, 연과, 전기투석법 등이 존재한다. 이 중에서 착화물을 이용한 비소의 처리방법은 비소의 제거 속도가 빠르고, 비가역적인 탈착이 쉽지 않다는 장점이 있다. 또한 흡착제로서 다원자 금속산화물인 Al(III), Fe(III), Ti(IV), Zr(IV) 등은 중심부의 집합체 형성에 있어 리간드 수착(收着)을 나타내는 속성이 있다. 이들 산화물 중 수산화 철 산화물(hydrate ferric oxide, HFO)은 값싸고 무해한 물질로 손쉽게 사용할 수 있고, 넓은 pH 범위에서 화학적으로 안정한 상태로 존재하여 비소의 흡착 제거에 유용하다. 하지만 우수한 비소 제거능력에도 불구하고, 미세한 입자와 그것의 응집은 연속적 시스템에서 고정상에 유용하지 못하다고 평가받고 있다(Matthew 등, 2003; Maria 등, 2008).

최근, Carmen 등(2008)의 연구를 보듯이 이러한 문제점을 극복하기 위해서 수산화 철 산화물(HFO) 입자를 알긴산(alginate), 제올라이트(zeolite), 활성탄(activated carbon), 강염기음이온(SBA)의 합성수지의 다공성 담체(media)표면에 피막형성을 통한 폴리머 형태의 혼합물로 비소를 효과적으로 제거하는 것이 보고되었으며, 이러한 결과는 아래와 같은 단계에 기인한 것으로 요약해 볼 수 있다. 첫째, HFO의 나노 입자는 미세한 다공성 폴리머 담체의 공극부분에 매우 빠른 속도로 확산되어 혼합 중합체를 형성한다. 둘째, 흡착과정은 주로 표면에서 발생하는데, 단위 면적당 높은 표면적을 가지고 있는 철 산화물과 다공성 구조의 폴리머 형태의 중합체는 흡착과정에 있어서 높은 시너지 효과를 발생한다(Luis 등, 2005). 셋째, 흡착과정에 있어 흡착제와 흡착질의 효율성을 결정하는 접근성 및 확산도 측면에서 폴리머 형태의 중합체는 비소제거의 중요한 매개역할을 하는 것이다.

이에 본 연구에서는 비소의 제거를 위하여, 기존의 연구에서 주로 사용하는 철 산화물(HFO) 입자와 폴리머 형태의 담체 대신 폐자원인 재활용 측면 석탄광산배수슬러지(CMDS, coal mine drainage sludge)를 사용하였다. 석탄배수광산슬러지는 철산화물을 기반

으로 게사이트(α -FeOOH), 칼사이트(CaCO_3)로 구성되어 있으며, 석탄광산배수를 전기적인 처리 및 자연적인 침전과정을 통하여 생성된다. 비소는 자연 상태에서 두 가지 산화상태인 As(III)와 As(V)가 존재하는데, As(III)의 pK_1 가 9.2이기 때문에 pH 9 이하에서는 대부분이 중성으로 존재하는 반면, As(V)의 pK_1 은 2.2이므로 pH 2 이상에서 대부분이 음이온 상태로 존재한다(Keisuke 등, 2003). 따라서 흡착메커니즘을 통하여 비소를 제거하는 것은 As(V) 상태가 최적이므로 흡착질의 비소는 5가 상태만을 고려했다.

본 연구에서는 액상상태의 As(V)를 산업폐기물인 석탄광산배수슬러지(CMDS)를 이용하여 제거하기 위해, 탈수 전과 후의 상태인 두 종류 CMDS를 사용하여 As(V)에 대한 흡착특성을 등온흡착실험과 동적 흡착실험을 통해 규명하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 흡착질로 사용한 As(V)는 아비산나트륨(KH_2AsO_4 , 99.9%, Sigma Aldrich)를 액상상태로 처리하여 사용하였다. 본 연구에서 흡착제로 사용된 두 종류의 CMDS는 강원도에 있는 석탄광산배수를 전기정화법으로 처리 시 발생하는 슬러지(CMDS 1)와 탈수처리하기 위하여 폴리머를 주입한 자연 건조시킨 슬러지를 이용했다(CMDS 2). CMDS 2에는 1g의 CMDS 당 무게비로 약 7.5%의 폴리머가 첨가되어 있다. CMDS 2에 들어있는 폴리머(날코코리아(주))는 Table 1과 같이 음전하를 띠고, Fig. 1과 같은 특성을 가진다(Jung 등, 2006).

Table 1. Characteristic of polymer containing CMDS 2

Material	FO4550SH
Charge	Anionic
Monomer	Acryl-Amide Acrylate
Molecular Weight	1.7×10^7
Viscosity(0.1%, cps)*	85
Polymer type	power

*Viscosity : Brookfield Model DV-1+ Viscometer 1 Spindle, 60rpm

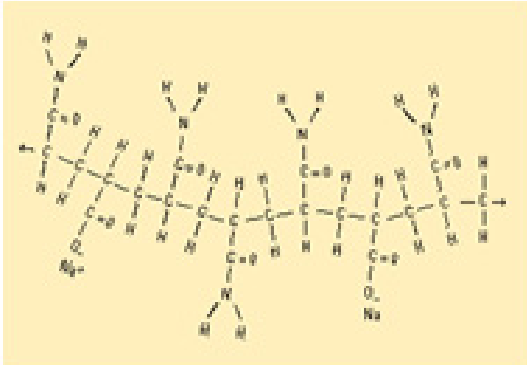


Fig. 1. Acrylamide-acrylate polymer (PHPA) qualities.

2.2. 실험장치 및 방법

액상상태의 As(V)는 KH_2AsO_4 , 99.9%를 이용하여 1 mole 당 분자량 및 순도를 고려하여 1 L Mass Flask 로 0.5, 1, 5, 10 과 20 mg/L 농도의 As(V) 용액을 투명 미디어 병에 300 mL씩 담은 후 CMDS 1과 CMDS 2 를 각각 0.1 g 을 넣어 25 °C, 200 rpm의 조건에서 진탕배양기(Shaking Incubator, HK-SIL 25C)로 반응시켰다.

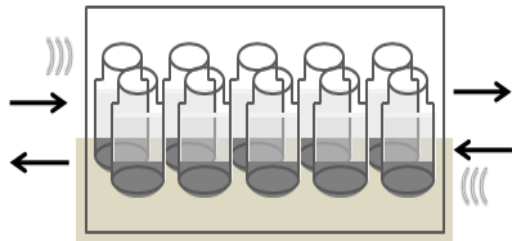


Fig. 2. thermo stated reciprocating shaker @ 200 strokes/min.

샘플링은 10, 20, 30, 40, 60, 180, 360, 540, 720, 960과 1440분에 시행했으며, 0.45 μm membrane filter(MCE membrane filter, Advantec MFS Inc.)를 사용하여 즉시 여과시켰다. As(V)농도의 측정을 위해서 ICP-AES(Varian Vista Pro with a VGA77)를 사용했다. pH 는 7로 고정시켜 pH에 대한 영향을 고려하지 않았다. 모든 실험은 25±2 °C에서 시행했다. 또한 XRD(X-ray diffraction), XRF((X-ray fluorescence spectrometer) 분석을 통하여 CMDS의 물리·화학적

특성을 분석하였다.

2.3. 등온흡착실험

일반적으로 흡착반응식 중 Langmuir 및 Freundlich 등온식을 이용할 경우 흡착제의 흡착능은 물론 등온식의 매개변수의 값으로부터 흡착제의 공정 적용 시 나타낼 수 있는 효과 및 흡착제의 파일럿 규모의 시스템 적용 가능성을 수치적으로 간단하게 평가할 수 있다(Won 등, 2007). 따라서 본 실험에 사용된 흡착제인 CMDS에 흡착질인 As(V)가 흡착되는 과정을 파악하기 위해 Langmuir 와 Freundlich 등온흡착식을 적용하였다.

Langmuir 등온식은 (1)과 같이 표현되며, 흡착상태를 나타내는 일반적인 방법으로 액상흡착현상을 정량적으로 표현하는 보편적인 방법이다(Sarioglu, 2005).

$$q_e = q_m b C_e / (1 + b C_e) \tag{1}$$

위 식에서 C_e 는 액체의 평형농도(mg/L)이고, q_e 는 평형에 도달한 흡착량(mg/g), q_m 은 완벽한 단분자층에서 단위 흡착제의 최대 흡착량을 나타낸다. 그리고 b 는 흡착제와 흡착질 사이에 관계된 Langmuir 상수이다. 보통 위 식의 역수에 C_e 를 양변에 곱해주어 직선 형태의 식으로 (2)로 표현한다.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m b} \tag{2}$$

여기서 평형흡착량 q_e 는 흡착과정에서의 매스발란스로부터 계산할 수 있다.

$$q_e = (C_0 - C_e) \times V / W \tag{3}$$

(3) 식에서 C_0 는 흡착제의 초기농도(mg/L), C_e 는 흡착제의 평형농도, V 는 용액의 부피(L), 그리고 W 는 흡착제의 양(g)이다.

이에 반해 Freundlich 는 실험자료의 분석하여 수학적 관계식의 형태로 표현하는 데 적합한 지수형의 등온식을 (4)와 같이 제시하였다(Shahwan, 2002).

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

위 식에서 K_f 와 n 은 Freundlich 상수로 각각 흡착 능력과 흡착세기를 나타내고, 일반적으로 양변에 상용로그를 취한 형태의 (5)와 같은 식으로 표현한다,

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad (5)$$

2.4. 동적흡착 실험

동적흡착은 흡착제와 흡착질간의 반응하는 흡착속도에 관한 것이다. 통상적으로 상관인자 (R^2)값이 1에 가까울수록 흡착제과 흡착질간의 반응속도를 성공적으로 나타냈다고 할 수 있다(Hameed 등, 2008). 유사일차모델(The Pseudo first-order equation; Lagergren, 1989)은 (6)과 같다.

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (6)$$

여기서 q_e 와 q_t 는 평형도달시간 t 에 도달하는 흡착능이고, 각각의 단위는 mg/g 이다. k_1 는 유사일차모델의 흡착속도상수(mg/g · min)이다. 초기조건을 적용하여 $t=0$ 에 $t=t$ 까지, $q_t=0$ 에서 $q_t=q_t$ 까지 상태로 적분하면 (7)식과 같다(Bhattacharya 등, 2008).

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (7)$$

유사일차모델과 더불어 Ibrahim 등(2008)의 연구를 보듯이 중금속 흡착을 묘사하는데 일반적으로 사용되는 유사이차모델(The Pseudo second-order equation; Ho와 McKay, 1999)은 (8)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

이 식에서 k_2 는 유사이차모델의 흡착속도상수(g/mg · min) 다. 초기조건을 적용하여 $t=0$ 에 $t=t$ 까지, $q_t=0$ 에서 $q_t=q_t$ 까지 상태로 적분하면 (9)식과 같다.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄광산배수슬러지(CMDS)의 물리·화학적 특성

석탄광산배수슬러지(CMDS)의 화학적 구성원소를 파악하기 위해 XRF(X-ray fluorescence spectrometer, Shimadzu, XRF-1700, Japan)분석을 실행했으며, 그 결과는 Table 2 와 같이 Fe_2O_3 비율이 65%, CaO 9.66%로 CMDS에서 차지하는 철과 칼슘의 함유량은 각각 45.2%와 6.9%이다. 이 분석결과는 CMDS와 As(V)의 흡착과정에서 철산화물이 주요한 영향을 준다는 것을 나타낸다.

Table 2. Physico-chemical properties of CMDS sampled

Element	Major elements (%) -XRF
SiO ₂	3.37
Al ₂ O ₃	1.11
Fe ₂ O ₃	65.00
CaO	9.66
MgO	0.48
Na ₂ O	0.15
K ₂ O	0.12
MnO	0.36
P ₂ O ₅	0.04
ZnO	0.04
CuO	0.01
Cr ₂ O ₃	0.03
NiO	0.03
PbO	0.02
CdO	0.01
As ₂ O ₅	0.04
Loss ignition	10.53

또한 XRD(X-ray diffraction)와 reference-intensity-ratio method (RIR method) ICDD PDF-4+ 데이터 결과를 분석한 결과 CMDS는 주로 침철석(α -FeOOH)과 방해석($CaCO_3$)과 같은 유사성분으로 이루어져 있었고, 이 구성 비율은 무게비로 약 70%와 30%를 각각

차지했다(Fig 2). 이는 Cui 등(2010)의 연구에서 CMDS를 구성하고 있는 침철석의 제터포텐셜 pH_{IEP} 가 9.56으로 pH 9.56 이하에서 CMDS 표면은 양전하를 띠고, 또한 비소는 pH 9.56 이하 액상에서 $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} 형태의 음전하를 띠기 때문에 흡착반응이 잘 일어날수가 있다.

한편, CMDS의 주성분 중 방해석에서 용출된 칼슘이온이 비산칼슘($Ca_3(AsO_4)_2$) 형태의 공침메커니즘을 가지는 것으로 조사되었나(James, 1999) 본 연구에서는 CMDS에 의한 As(V)흡착특성 및 반응속도만 연구하였다.

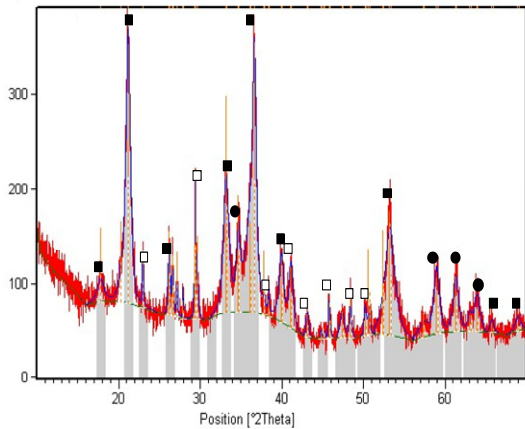


Fig. 3. XRD of CMDS [goethite(■), calcite(□), overlapped by goethite and calcite(●)].

3.2. 등온흡착 실험

As(V)와 CMDS의 등온흡착 실험 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 흡착제 CMDS와 액상상태의 As(V)농도를 0.5, 1, 5, 10, 20 mg/L로 하여 48시간 반응시킨 후 CMDS 1과 CMDS 2에 흡착된 비소의 흡착능을 비교한 결과 평균 16.503 mg/g, 16.479 mg/g으로 큰 차이를 나타내지 않았다.

식 (1)과 (4)를 이용하여 Langmuir 등온흡착식과 Freundlich 등온흡착식의 parameter를 구한 결과를 Table 3에 나타내었다. 두 모델의 상관계수(R^2)의 평균값은 Langmuir 모델 0.987, Freundlich 모델 0.8643으로 Langmuir 모델이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 CMDS의 주 흡착사이트가 침철석(goethite;

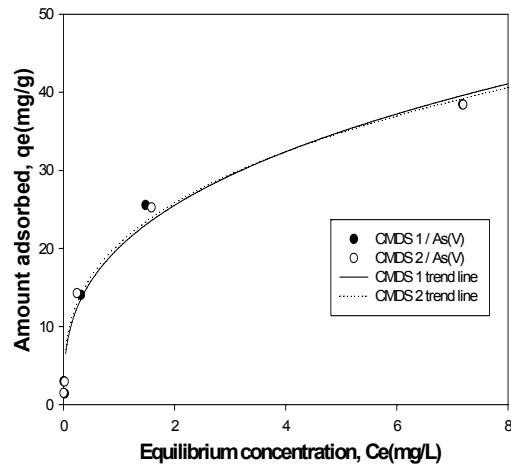


Fig. 4. Adsorption amount of As(V) on CMDS.

FeO(OH))이 지배적이므로 표면 단분자층의 흡착과정을 가정한 Langmuir 모델의 기본가정에 충실하다. 즉, 석탄광산배수슬러지(CMDS)와 As(V)의 반응결과는 Langmuir 등온흡착모델에 적용하는 것이 더 잘 부합한다. 최대흡착량의 정도를 나타내는 Langmuir 등온흡착모델의 q_m 값은 CMDS 1에서 40.816, CMDS 2에서 39.682의 결과로 두 종류의 CMDS에서 별 다른 차이를 보이지 않았다. 반면 Freundlich 등온흡착모델에서 흡착능의 세기를 나타내는 K_f 값이 CMDS 1에서 1.2411, CMDS 2에서 1.2918로 CMDS 2에서 다소 높은 결과를 보였다.

이 결과를 본 연구와 유사한 흡착제인 재강슬러그와 As(V)를 이용한 Oh 등(2010)의 연구와 CMDS 1과 비교한 결과, 반응조건에 다소차이가 있었지만 q_m 값은 0.3760, K_f 값은 0.1797로 CMDS 1의 경우보다 현격하게 낮았다. Langmuir 등온식의 최대 흡착량인 q_m 값 및 흡착능의 세기를 가늠하는 Freundlich 등온식의 K_f 값 모두 CMDS 1이 높았다. 재강슬래그의 철 함유량이 38% 보다 CMDS의 철 함유량이 45.2% 보다 상대적으로 많기 때문이라고 사료된다. 한편, As(V)를 제거하기 위해 폴리머를 첨가한 HFO를 흡착제로 사용한 Vatutsina 등(2007)의 결과를 CMDS 2 비교한 결과 초기 q_m 값이 75.75 로 CMDS 2보다 높게 나왔다. 이는 HFO에 이온교환체로 1.29%(1.4 mmol Fe/g polymer) 들어있는 폴리머(FIBAN)의 영

Table 3. Langmuir and Freundlich adsorption isotherms's parameter

	Langmuir adsorption isotherm			Freundlich adsorption isotherm		
	q_{max}	b	R^2	K_f	n	R^2
CMDS 1/As(V)	40.816	1.929	0.9889	1.2411	2.8	0.7536
Oh et al.(2010)	0.3760	1.0306	0.9775	0.1797	0.3675	0.9940
CMDS 2/As(V)	39.682	2.709	0.9885	1.2918	2.5	0.9732
Vatutsina(2007)	75.75	3.23	-	-	-	-

향 때문이라 판단된다.

3.3. 동적흡착 연구

두 종류의 흡착제 CMDS 1과 CMDS 2의 흡착속도 상수 값을 비교하기 위하여 유사일차모델과 유사이차모델식을 사용하였고 결과를 Table 4에 나타내었다. CMDS와 As(V)의 흡착반응은 24 시간이지만, 실제 As(V)농도가 0.5 및 1 mg/L에서는 두 종류의 CMDS 모두 1시간 내 반응이 종료되었다. Fig. 5는 유사일차모델과 유사이차모델을 CMDS 1에 적용시킨 것이고, Fig. 6은 유사일차 모델과 유사이차모델을 CMDS 2에 적용시킨 결과인데 5 mg/L 기준으로 반응속도상수가 큰 쪽으로 줄어드는 것으로 확인할 수 있다. 또한 유사일차모델의 상관계수의 평균값이 0.97822로, 유사이차모델의 상관계수의 평균값인 0.99365보다 낮게 나와 As(V)와 흡착제인 CMDS 사이의 동적흡착 실험은 유사이차모델을 적용시키는 것이 더 적합하다고 할 수 있다.

두 모델의 반응속도상수는 Oh 등(2010)의 연구결과와 유사하게 초기농도가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보였다. 유사일차모델에서의 CMDS 2의 속도상수의 값은 As(V)가 0.5 mg/L에서 CMDS 1과 비교하여 2배 이상 차이가 나며, 유사이차모델에서는 3.7 배 이상 차이가 난다. As(V)의 농도가 1 mg/L일 때는 유사일차모델에서 4.79 배, 유사이차모델에서 33.5 배 이상 차이가 난다. 반면, 비소 농도가 증가할수록 속도상수의 값이 모두 감소하는 것으로 미루어 보아 As(V) 농도에 따른 적정 CMDS 주입량을 예측할 수 있다. 또한 As(V)의 최대흡착량은 유사하나, CMDS 2의 반응속도상수 값이 CMDS 1보다 큰 값을 보였는데, 이는 현장적용 시 반응기 불륨, 부지면적 등의 경제적 문제를 고려할 때 CMDS 2 사용이 훨씬 더 효율적인 것으로 평가된다.

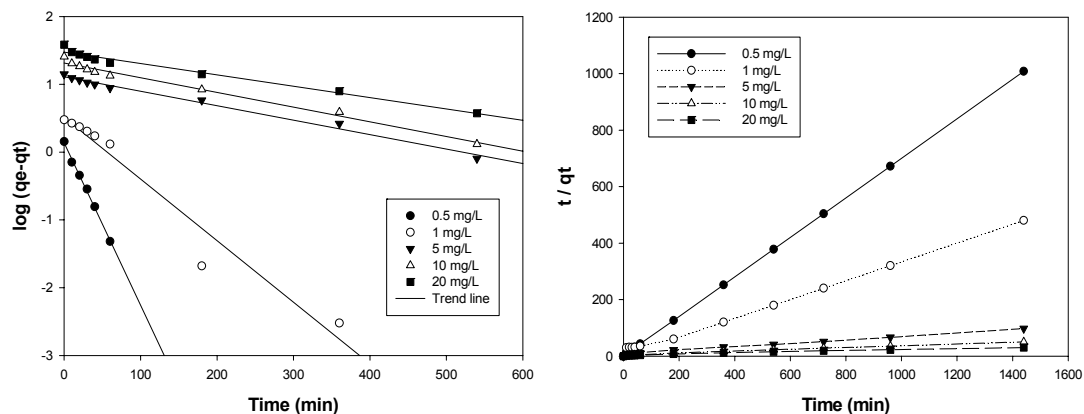


Fig. 5. Pseudo-first-order kinetics and pseudo-second-order kinetics for As(V) sorption on coal mine drainage sludge(CMDS 1) at 25 °C.

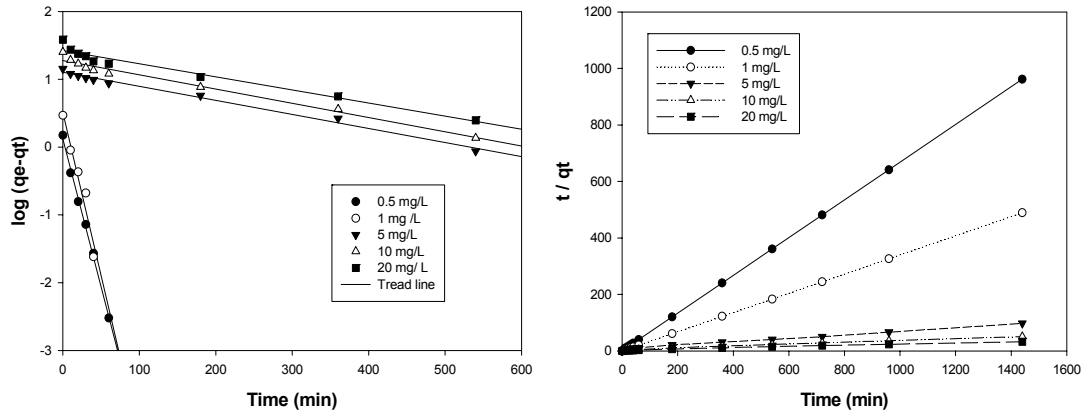


Fig. 6. Pseudo-first-order kinetics and pseudo-second-order kinetics for As(V) sorption on coal mine drainage sludge(CMDS 2) at 25 °C.

Table 4. Langmuir and Freundlich adsorption isotherms's parameter

	Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model	
	As(V)	k_1 (mg/g · min)	R^2	k_2 (g/mg · min)	R^2
CMDS 1	0.5 mg/L	0.05527	0.9968	0.152721	0.9999
	1 mg/L	0.02096	0.9567	0.007123	0.9965
	5 mg/L	0.00484	0.9895	0.000624	0.9930
	10 mg/L	0.00507	0.9860	0.000452	0.9931
CMDS 2	0.5 mg/L	0.11077	0.9500	0.5741724	1.0000
	1 mg/L	0.10041	0.9964	0.2387979	1.0000
	5 mg/L	0.00484	0.9900	0.0007442	0.9939
	10 mg/L	0.00484	0.9778	0.0005347	0.9933
Oh et al. (2010)	1.42 mg/L	0.0115	-	0.2717	-
	2.36 mg/L	0.0056	-	0.0590	-
	4.17 mg/L	0.0055	-	0.0377	-
	6.14 mg/L	0.0052	-	0.0288	-

4. 결론

본 연구에서는 As(V) 제거를 위하여 폴리머가 없는 석탄광산배수슬러지(CMDS 1)와 포함되어 있는 석탄배수슬러지(CMDS 2)를 사용하였다. CMDS와 As(V)의 흡착특성을 등온흡착실험 및 동적흡착모델로 분석하였고, XRD, XRF 통해 CMDS의 물리·화학적 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) CMDS는 주로 침철석(α -FeOOH)과 방해석(CaCO_3)으로 구성되어 있었고, 구성 비율은 무게비로 약 70%와 30%이었다. 이 결과는 As(V)와 CMDS의

흡착과정에서 철산화물이 지배적인 요소라는 것을 나타낸다. 또한 CMDS 1은 탈수 전 슬러지를 자연 건조시켜 사용하였고, CMDS 2는 폴리머를 주입하여 탈수시킨 슬러지를 사용하였으며 CMDS에 무게 비율로 7.5%의 폴리머가 함유되었다.

2) CMDS와 As(V) 등온흡착 실험결과 Langmuir 등온흡착모델이 Freundlich 모델보다 더 적합했다. CMDS 1과 CMDS 2에 흡착된 비소의 양은 큰 차이가 없었고 두 모델의 상관계수의 평균값은 Langmuir 모델에서 0.987, Freundlich 모델에서 0.8643 으로 Langmuir 모델이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

3) 동적흡착실험 결과를 유사일차모델과 유사이차 모델을 통하여 분석한 결과 두 모델의 반응속도상수 모두 초기농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 유사일차모델의 상관계수의 평균값이 0.978, 유사이차모델의 상관계수의 평균값은 0.994로 비소와 CMDS 사이의 동적흡착실험은 유사이차모델을 적용시키는 것이 더 합리적이었다.

4) As(V)의 전 농도구간에서 CMDS 2의 속도상수 값이 폴리머가 없는 CMDS 1 값보다 더 큰 값을 보였다.

따라서 As(V)를 제거하기 위한 흡착제로 최대흡착량은 유사하나 반응속도상수 값이 큰 FO4550SH 폴리머가 포함된 CMDS 2를 사용하는 것이 더 효율적인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업(GAIA Project, No.173-091-003)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Bhattacharya, A. K., Naiya, T. K., Mandal, S. N., Das, S. K., 2008, Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr(VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents, *Chemical Engineering Journal*, 137, 529-541.
- Carmen, M. I., Constantin, C., Florin, R., Ion, U., 2008, Characterization of hybrid inorganic/organic polymer-type materials used for arsenic removal from drinking water, *Reactive & Functional Polymer*, 68, 1578-1586.
- Carmen, M. I., Constantin, C., Florin, R., Ion, U., 2008, Water research, Evaluation of a novel hybrid inorganic/organic polymer type material in the Arsenic removal process from drinking water, 42, 4327-4333.
- Hameed, B. H., Mahmoud, D. K., Ahmad, A. L., 2008, Sorption of basic dye from aqueous solution by pomelo(citrus grandis) peel in a batch system, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng.*, 316, 78-84.
- Ibrahim, K., Mehmet, U., Hamdi, K., Celik, A., 2008, Adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation, *Bioresource Technology*, 99, 492-501.
- James, V., Bothe, J. R., Paul, W. B., 1999, Arsenic Immobilization by Calcium Arsenate Formation, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3806-3811.
- Jung, S. H., Lee, J. G., Song, H. S., Kim, N. H., Kwon, J. H., Lee, S. H., 2006, Viscosity index as continuous control of polymer feed in treatment of waterworks sludge, *Proceedings of the Korean Society of Water and Wastewater.*, 113-121.
- Lee, T. H., 2010, http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2010/03/23/2010032300100.html.
- Keisuke, F., Tsutomu, S., Nobuyuki, Y., 2003, Solid-Solution Reactions in As(V) Sorption by Schwertmannite, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3581-3586.
- Luis, C., Arup, K. S., 2005, Arsenic Removal Using Polymer-Supported Hydrated Iron(III) Oxide Nanoparticles: Role of Donnan Membrane Effect, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 6508-6515.
- Maria, P. A., Jordi, C., Maria, M., Javier, G., 2009., Arsenic removal by goethite and jarosite in acidic conditions and its environmental implications., *Journal of Hazardous Material* 171., 965-972.
- Matthew, J. D., Arup, K. S., John, E. G., 2003, Arsenic removal using a polymeric/inorganic hybrid sorbent, *Water Research*, 37, 164-176.
- Mingcan, C., Jang, M., Cho, S. H., Khim, J. H., 2010, Kinetic and thermodynamic studies of the adsorption of heavy metals on to a new adsorbent: coal mine drainage sludge, *Environmental Technology*, 31(11), 1203-1211.
- Oh, C. T., Rhee, S. S., Igarashi, T., Kon, H. J., Lee, W. T., Park, J. B., 2010, Sorption Characteristics of Arsenic on Furnace Slag by Adsorption Isotherm and Kinetic Sorption Experiments, *Proceedings of the Korean Geotechnical Society*, 26(9), 37-45.
- Sharma, I., Goyal, D., 2010, Adsorption kinetics : Bioremoval of trivalent chromium from tannery effluent by aspergillus sp. biomass, *Research Journal of Environmental Science*, 4(1), 1-2.

- Shahwan, T, Erten, H. N, 2002, Thermodynamic parameters of Cs^+ sorption natural clays, J. Radio-analytical Nuclear Chem., 253(1), 115-120.
- Sarioglu, M., Atay, U. A, Cebeci, Y, 2005, Removal of copper from aqueous solution by phosphate rock, Desalination 181, 303-311.
- Vayusina, O. M., Soldayov, V. S., Sokolova, V. I., Johann, J., Bissen, M., Weissenbacher, A, 2007, A new hybrid (polymer/inorganic) fibrous sorbent for arsenic removal from drinking water, Reactive & Functional Polymers 67, 184-201.
- Won, S. H., Lee, Y. C., 2007, Adsorption Behavior of p-Chlorophenol on Nonionic Polymeric Adsorbents: Adsorption Equilibrium Behavior and Evaluation for Adsorbability of Adsorbents, Proceedings of the Korean EHS Assessment, 5(4), 13-23.